

ОТЗЫВ

официального оппонента Быкова Андрея Михайловича, доктора физико-математических наук, профессора, руководителя Отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук» на диссертацию

Ксенофонтова Леонида Трофимовича

«Теория ускорения космических лучей в остатках сверхновых»,

представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

Остатки сверхновых звезд являются эффективными ускорителями частиц до высоких энергий порядка 10^{15} эВ. По современным представлениям, остатки сверхновых (СН) способны обеспечивать наблюдаемый на Земле спектр высокоэнергичных космических частиц (галактических "космических лучей"). Таким образом, исследование процессов ускорения частиц ударными волнами в остатках сверхновых звезд является **фундаментальной и актуальной** задачей современной физики.

Ускорение космических лучей ударной волной в остатке сверхновой происходит по механизму Ферми 1-го порядка, путём рассеяния частиц на флуктуациях магнитного поля и многократном пересечении ими ударного фронта. В процессе ускорения значительная часть мощности ударной волны трансформируется в энергию релятивистских ускоренных частиц (космических лучей). Это оказывает существенное влияние на динамику расширения остатка. Ускоренные частицы уходят от ударной волны на расстояния много больше ширины вязкого скачка; они формируют широкий предфронт, и значительно повышают полное сжатие ударной волной, одновременно уменьшая сжатие на самом вязком скачке. В предфронте ударной волны распределение космических лучей анизотропно. Анизотропия распределения приводит к плазменным неустойчивостям и, как следствие, к усилению флуктуаций магнитного поля и нагреву тепловой плазмы в предфронте из-за диссипации энергии усиленных мод. Поскольку распределение космических лучей определяет рост магнитных полей и влияет на структуру и динамику ударной волны, а те, в свою очередь, определяют процесс ускорения частиц, ускорение космических лучей в остатках сверхновых является сложным нелинейным процессом.

Механизм ускорения космических лучей ударными волнами был предложен Г.Ф.Крымским в 1977 и получил существенное развитие в работах Е.Г.Бережко и сотрудников института космофизики в Якутске. В представленной диссертации Ксенофонтова Л.Т. выполнены **новые** важные оригинальные исследования по проблеме ускорения космических лучей ударными волнами в остатках сверхновых. В основу полученных в работе результатов положен оригинальный численный метод совместного решения конвекционно-диффузионного уравнения переноса космических лучей, и гидродинамических уравнений, описывающих тепловую плазму. Этот метод позволяет рассчитывать процесс ускорения космических лучей в остатке сверхновых и их нетепловое излучение.

На основе сравнения смоделированного пространственного распределения излучения и его модельных спектров с наблюдаемым в остатках сверхновых показано,

что мощность источников космических лучей, связанных с остатками сверхновых, достаточна для возмещения потерь галактических космических лучей, связанных с их выходом из Галактики. Представленная в диссертации модель предполагает значительное усиление магнитного поля в остатке в процессе ускорения. Модель позволяет объяснить все наблюдаемые свойства излучения остатков SN 1006, SN Тихо и SN 1987А, а для последнего предсказывает изменение наблюдаемого излучения в ближайшие годы. Модель удовлетворительно воспроизводит наблюдаемый спектр и химический состав космических лучей вплоть до энергий 10^{17} эв. Результаты моделирования показывают, что процессы образования и переускорения вторичных частиц в остатках сверхновых вносят значительный вклад в спектр вторичных космических лучей.

Диссертация объемом 222 страницы, включая шесть глав основного текста, введение, заключение, приложение, 51 рисунок, и список литературы (233 наименования), представляет собой законченное оригинальное научное исследование ускорения космических лучей в остатках сверхновых.

Во *Введении* автор обосновывает актуальность темы и описывает основные цели исследований диссертационной работы.

В *Главе 1* развита самосогласованная нелинейная кинетическая теория ускорения космических лучей в остатках сверхновых. Приведены газодинамические уравнения, описывающие поведение тепловой плазмы, и конвекционно-диффузионное уравнение переноса космических лучей. Проанализирован процесс инжекции частиц в процесс ускорения и показано, что инжекция электронов на несколько порядков ниже, чем протонов. Найдено, что инжекция частиц в случае параллельной ударной волны значительно выше, чем в случае поперечной ударной волны; при анализе учтена случайная компонента поля. Для остатка SN 1006, на основе сравнения его наблюдаемого излучения с предсказанным в модели, показано, что эффективная инжекция в нём идёт в полярных областях, занимающих ~20% поверхности ударной волны — там, где ударная волна близка к параллельной. Приведены выражения для потоков излучений, порождаемых космическими лучами: синхротронного, обратного комптоновского и γ -излучения за счет распада π^0 -мезонов, рождающихся в неупругих столкновениях протонов.

В *Главе 2* показана необходимость сверхадиабатического усиления магнитного поля в остатках сверхновых, следующая из сопоставления волокнистой структуры рентгеновского излучения остатков, наблюдаемых рентгеновскими телескопами Chandra и XMM-Newton, и смоделированных профилей излучения. В главе подробно исследованы профили рентгеновского синхротронного излучения остатков SN 1006 и SN Тихо.

В *Главе 3* найдены физические параметры предложенной теоретической модели ускорения космических лучей. Параметры получены путем сравнения модельных и наблюдаемых радио- и рентгеновских синхротронных спектров и γ -излучения. В главе проанализировано излучение остатков SN 1006 и SN Тихо. Показано, в частности, что предложенная модель ускорения хорошо объясняет многоволновой спектр остатка SN Тихо в предположении, что ударная волна распространяется в разреженную среду с вкраплениями плотных облаков.

В *Главе 4* построена модель временной эволюции нетеплового излучения остатка СН 1987А. Показано, что наблюдаемое радиоизлучение остатка могут порождать частицы, ускоренные ударной волной, бегущей по звёздному ветру предсверхновой. На основе сравнения модельных расчётов с имеющимся экспериментальными данными получены ограничения на физические параметры остатка СН 1987А. Дано предсказание о возможности наблюдения этого остатка в ближайшие годы в ТэВ-ом диапазоне энергий γ -квантов, при помощи черенковских телескопов.

В *Главе 5* исследован формируемый остатками сверхновых спектр космических лучей для различных физических параметров модели ускорения. Определены стадии временного расширения остатков, на которых частицы ускоряются до наибольших энергий. Показано, что модель способна объяснить наблюдаемый химический состав космических лучей.

В *Главе 6* исследована генерация вторичных космических лучей в остатках сверхновых. Показано, что эффекты до-ускорения существующих галактических космических лучей, и расщепление ядер первичных космических лучей в неупругих столкновениях в остатках сверхновых существенно влияют на энергетические спектры вторичных частиц космических лучей. Рассчитано отношение вторичного элемента бора к углероду; показано, что на энергиях выше 1 ТэВ/нуклон это отношение практически не зависит от энергии частиц, если остаток сверхновой находится в межзвездной среде с концентрацией $\sim 1 \text{ см}^{-3}$. В главе также рассчитан спектр позитронов. Показано, что модель может объяснить наблюдаемый рост с энергией отношения числа позитронов к числу электронов.

В *Заключении* автором сформулированы основные результаты диссертации, а в *Приложении* подробно описанная численная схема решения самосогласованной задачи ускорения космических лучей сферической ударной волной в остатке сверхновой.

Достоверность и надёжность результатов диссертационной работы подтверждаются использованием адекватных математических методов, а также согласованностью полученных данных с результатами других научных групп. Результаты диссертации прошли проверку на многочисленных международных и всероссийских конференциях и были опубликованы в 30 статьях, входящих в перечень ВАК ведущих рецензируемых журналов и изданий.

Диссертация не лишена отдельных недостатков. В качестве замечаний и пожеланий можно выделить следующие:

1. В используемом для расчетов коэффициенте диффузии космических лучей предполагается, что величина магнитного поля B имеет зависимость от плотности плазмы ρ вида $B=B_0 \rho/\rho_0$, где B_0, ρ_0 — магнитное поле и плотность в невозмущенной ударной волной среде. При этом в расчетах B_0 берется усиленным по сравнению с характерным полем межзвездной среды. Однако усиление магнитного поля в предфронте ударной происходит за счет плазменных неустойчивостей; поэтому магнитное поле, вообще говоря, не обязано меняться пропорционально изменению плотности. Поле может иметь отличную от использованной зависимость от координаты. Существенно было бы проследить, как изменятся результаты расчетов, если выбрать другие зависимости магнитного поля от координат.

2. В работе рассмотрена только резонансная неустойчивость; однако, известно, что гораздо более быстро-растущей неустойчивостью является коротковолновая неустойчивость Белла. Имело бы смысл обсудить в работе, как могут измениться расчеты при учете данной неустойчивости.
3. При сравнении наблюдательных данных и модельных расчетов по химическому составу космических лучей высоких энергий не обсуждаются последние экспериментальные данные обсерватории LOFAR [S. Buitink et. al., A large light-mass component of cosmic rays at 10(17) electronvolts from radio observations, Nature, т. 531, с. 70–73 (2016)]. Было бы важно понять, как модели, развитые в диссертации, соотносятся с результатами анализа данных LOFAR.
4. В тексте диссертации встречаются незначительные опечатки (например, на стр. 6, 8, 81, 126). После выражения (1.5) не определено, что означает подстрочный индекс A ; пояснения даны только в следующих главах. Для удобства прочтения текста обозначение κ_0 , входящее в выражение (A.1), стоило бы определить конкретно после данного выражения.

Следует подчеркнуть, что вышеперечисленные недостатки не имеют принципиального характера и не снижают высокой общей оценки результатов, полученных в диссертации.

Диссертация представляет собой законченное оригинальное научное исследование, вносящее существенный вклад в решение фундаментальной физической проблемы ускорения частиц в остатках сверхновых. Результаты, полученные в диссертационной работе Ксенофонтова Л.Т., могут быть использованы в научных учреждениях, в которых ведутся работы по астрофизике высоких энергий: ИКИ РАН, ИЯИ РАН, ФТИ им. Иоффе РАН, ФИАН им П.Н.Лебедева, ИЗМИРАН, ИТЭФ, МГУ им. М.В.Ломоносова, АКЦ ФИАН, СПбГУ и др.

Основное содержание диссертации опубликовано в ведущих отечественных и зарубежных журналах и широко цитируется в научных изданиях. Автореферат полностью отвечает содержанию диссертации.

Диссертационная работа полностью отвечает требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а Леонид Трофимович Ксенофонтов, **безусловно, заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук** по специальности 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц.

Официальный оппонент

Руководитель отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики ФГБУН ФТИ им. А.Ф.Иоффе,
доктор физ.-мат. наук, профессор

Подпись Быкова А.М. заверяю,
ученый секретарь ФГБУН ФТИ им. А.Ф.Иоффе,
доктор физ.-мат. наук, профессор



А.М. Быков

Быков А.М.

25.02.2017

А.П. Шергин

Шергин А.П.